

7^e Colloque National BRG – STRASBOURG

LES RESSOURCES GÉNÉTIQUES
À L'HEURE DES GÉNOMES

*CHARACTERISING GENETIC RESOURCES
IN THE GENOMIC ERA*

Les Actes du



n°7

Modélisation multi-agents des réseaux d'échanges de semences pour la conservation de la biodiversité agricole

Didier BAZILE^{(1)*}, Géraldine ABRAMI⁽²⁾, Souleymane DEMBELE⁽³⁾,
Harouna COULIBALY⁽³⁾, Christophe LE PAGE⁽⁴⁾, Mathieu DIONNET⁽⁵⁾,
Jacques CHANTEREAU⁽⁶⁾, Céline BOUÉ⁽⁶⁾, Mattea ORSINI⁽¹⁾,
François BOUSQUET⁽¹⁾, Jean-Louis PHAM⁽⁷⁾, Kadiatou SANGARE⁽³⁾,
Gilles BEZANÇON⁽⁸⁾

⁽¹⁾CIRAD, UPR 47 "GREEN", 34398 Montpellier, France

⁽²⁾CIRAD, UMR G-Eau, 34398 Montpellier, France

⁽³⁾IER, LaboSEP, Bamako, Mali

⁽⁴⁾CIRAD, UPR 47 "GREEN", Bangkok, Thailand

⁽⁵⁾CIRAD, UPR G-Eau, 34398 Montpellier, France

⁽⁶⁾CIRAD, UPR Agrobiodiversité en savane, 34398 Montpellier, France

⁽⁷⁾IRD, UMR DIA-PC, BP 64501, 34394 Montpellier, France

⁽⁸⁾IRD, Niger, BP 11416, Niamey, Niger

Abstract: Modelling the seed system with agent-based models. This study deals with cereal varieties local management and biodiversity preservation in Mali. The State is not able to provide the adequate seeds to the farmers which supplying mainly relies on seeds exchanges within existing social networks. This informal seed system operates a collective management of many traditional varieties. Our research aims at improving the knowledge on this traditional seeds system. We are particularly interested in identifying the potential and existing roles of the different stakeholders for biodiversity preservation. We use a methodology based on the concept of companion modeling. On the basis of initial hypotheses extracted from an extensive set of surveys, we have produced several successive models using Role-Playing Games and Agent-Based Systems. The process has evolved through the rendering and questioning of these models in specific workshops. The main result of this process is a global and generic agent-based model that will be used to simulate with the stakeholder new regulations for the collective management of cereals biodiversity.

Mali/ Niger/ Biodiversity/ Agriculture/ Collective management/ Agent-based models

Résumé : Notre étude traite de la gestion locale des variétés de céréales au Mali dans un objectif de conservation de la biodiversité. Pour pallier aux insuffisances de

* Correspondance et tirés à part : didier.bazile@cirad.fr

L'Etat, un système informel basé sur les réseaux sociaux existants s'est développé pour approvisionner les paysans en semences. Il permet la gestion collective d'un grand nombre de variétés traditionnelles. Notre recherche cherche à améliorer les connaissances sur ce système semencier traditionnel et notamment sur le rôle des différents acteurs en jeu dans le maintien de la biodiversité. La méthodologie repose sur les concepts de la modélisation d'accompagnement. Sur la base d'hypothèses initiales issues d'un travail d'enquête sur la gestion paysanne des variétés, nous avons produit une série de modèles remis en question au cours d'ateliers successifs utilisant les jeux de rôles et les systèmes multi-agents. Le résultat de ce travail est un modèle qui servira à simuler, avec l'ensemble des acteurs, de nouvelles régulations dans le cadre de la gestion collective de la biodiversité des céréales.

Mali/ Niger/ Biodiversité/ Agriculture/ Gestion collective/ Modèle multi-agents

1. INTRODUCTION

Notre recherche se rattache au concept d'agrobiodiversité pour décrire les rapports entre la diversité biologique, environnementale et socioculturelle [11], [12]. Nous examinons les nombreuses manières dont les paysans exploitent la biodiversité pour la production agricole. La prise en compte exhaustive des parcelles cultivées d'un village permet de recenser l'ensemble des cultivars présents mais c'est au final la multiplicité des stratégies des paysans qui dessine la richesse du patrimoine biologique du village et l'inscrit dans la logique de diversité culturelle propre aux sociétés agricoles des pays du Sud. C'est donc en analysant comment et pourquoi les agriculteurs choisissent leur portefeuille de variétés que nous pouvons comprendre les mécanismes de gestion en jeu et chercher à les améliorer.

Dans un contexte quasi non marchand, la recherche montre l'importance du lien entre les échelles spatiales pour appréhender les dynamiques locales (paysan, communauté) autour de la circulation et de la gestion des semences. La présente étude explicite les liens existants entre le paysan (en tant qu'entité individuelle) et son environnement (au sens large) puis, formalise les règles de choix et les stratégies en expliquant les changements dans les variétés semées.

Après avoir restitué le contexte et les objectifs de ce travail, nous présentons la démarche générale de modélisation d'accompagnement qui sous-tend notre méthodologie, ainsi que les outils que nous utilisons : les jeux de rôles et les systèmes multi-agents. Nous détaillons ensuite l'évolution de notre compréhension du système aux différentes étapes du processus de recherche : formalisation des hypothèses issues d'enquêtes de terrain dans un modèle multi-agents expert initial ; désagrégation de la représentation

dans trois jeux de rôles portant sur les différents modules de décision qui permettent de caractériser les liens du paysan à son environnement ; intégration des nouvelles hypothèses issues des ateliers de jeux dans un modèle multi-agents global à portée générique. Nous concluons alors sur la manière dont ce modèle, après avoir été validé et paramétré par les paysans, nous permet d'explorer et de construire de nouvelles règles de gestion des semences via la simulation des dynamiques d'évolution des variétés au sein des villages.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Contexte et objectifs

La diversité des ressources phytogénétiques constitue la base biologique de la sécurité alimentaire mondiale car elle fournit des moyens de subsistance à tous les habitants de la planète [13], [17]. Ces ressources sont la matière première la plus importante pour le sélectionneur et l'intrant le plus essentiel à l'agriculteur ; elles sont donc indispensables à la durabilité des systèmes agricoles. Beaucoup de ressources phytogénétiques en agriculture sont le résultat d'une intervention de l'homme et plus récemment les sélectionneurs ont exploité cette diversité avec des effets remarquables sur l'amélioration des variétés. La viabilité des ressources génétiques en agriculture nécessite une gestion humaine, active et continue. Ainsi, depuis la Convention de Rio sur la Biodiversité [15], le maintien de la diversité des pratiques humaines apparaît de plus en plus comme une solution pour la conservation d'une diversité élevée dans la biosphère. Ces variétés continuent d'évoluer en permanence sous l'effet de pressions de sélection humaine et environnementale, de flux de semences au sein des réseaux d'échanges et de choix formés par des identités socioculturelles différentes. Ces processus participent à la conservation dynamique du patrimoine génétique et ainsi à la création de la nouvelle variabilité génétique d'importance globale. Au Sahel, les agriculteurs ont essentiellement recours à des systèmes semenciers informels, conçus autour de leur propre production de semences [2]. Même s'ils sont méconnus, ils participent à plus de 90% à l'approvisionnement de proximité en semences de céréales. Ils sont aujourd'hui confrontés au renforcement formalisé, habituellement commercial, des systèmes nationaux de production des semences [3]. Les paysans ont maintenu leur système local parce qu'il est en mesure de leur apporter plus de sécurité et de productivité que le système semencier national grâce à un fonctionnement susceptible d'entretenir une plus grande diversité. Néanmoins les paysans peuvent accéder aux variétés du Système Semencier National dès lors qu'elles répondent à leurs besoins variétaux et objectifs d'approvisionnement en semences.

Actuellement, la gestion des semences par le paysan et l'amélioration des variétés par les chercheurs ont beaucoup de difficultés à trouver des points de rencontre. Les différents acteurs impliqués dans la conservation de l'agrobiodiversité (chercheurs, développeurs et paysans) ont pourtant tous besoin d'intégrer les savoirs scientifiques et locaux dans une représentation partagée du système semencier. Ceci est indispensable pour bâtir un programme commun cohérent avec les différents acteurs pour que le maintien *in situ* de la diversité repose sur les valeurs socio-économiques et culturelles. L'objectif général de cette recherche est de renforcer notre capacité commune (paysans et chercheurs) à évaluer l'effet des pratiques de gestion des semences sur le maintien de la diversité variétale. De multiples acteurs participent à la fourniture des semences ; ils incluent notamment la famille, les organisations paysannes et ONG locales, les distributeurs privés, la recherche et le secteur semencier public. Ces acteurs, leurs comportements et leurs multiples interactions constituent le « système semencier ».

La présente étude porte sur les systèmes locaux de gestion des semences de sorgho au Mali sur une zone allant de Gao à Sikasso. Le sorgho y est la principale céréale alimentaire et les paysans cultivent majoritairement des variétés locales, rustiques et adaptées aux conditions agroclimatiques difficiles de la zone soudano sahélienne. Dans le sud de la zone d'étude, où le climat est plus favorable à l'intensification des cultures, le sorgho est concurrencé par le maïs et on observe une érosion variétale. Dans ce contexte, le taux d'adoption des variétés améliorées issues de la recherche reste marginal et l'approvisionnement en semence se fait essentiellement de manière informelle.

2.2. Méthodes et outils

La méthodologie générale repose sur le développement, via une démarche de modélisation d'accompagnement, d'un modèle du système semencier capable de représenter la diversité des situations agricoles présentes au Mali. Ce modèle doit permettre de caractériser les circuits d'approvisionnement en semences et l'accessibilité des paysans au sein de la communauté à la diversité des variétés. Le souci de développer un modèle multi-agents intégrant dès sa conception des éléments susceptibles d'augmenter la généralité et l'adaptabilité du modèle a été pris en compte en travaillant à plusieurs échelles et sur différents sites. Les sites d'étude du Mali s'étalent sur tout le gradient nord-sud de la zone de culture du sorgho pluvial (de 16°N à 11°N). Les enquêtes portent sur une trentaine de village avec des études approfondies sur 5 sites pilotes entre Gao et Sikasso (fig.1). Les différents ateliers organisés au cours de cette recherche ont permis de faire interagir entre eux les paysans de ces 5 villages puis d'étendre les

échanges avec des paysans de 4 régions agricoles du Niger où des enquêtes complémentaires ont été conduites.

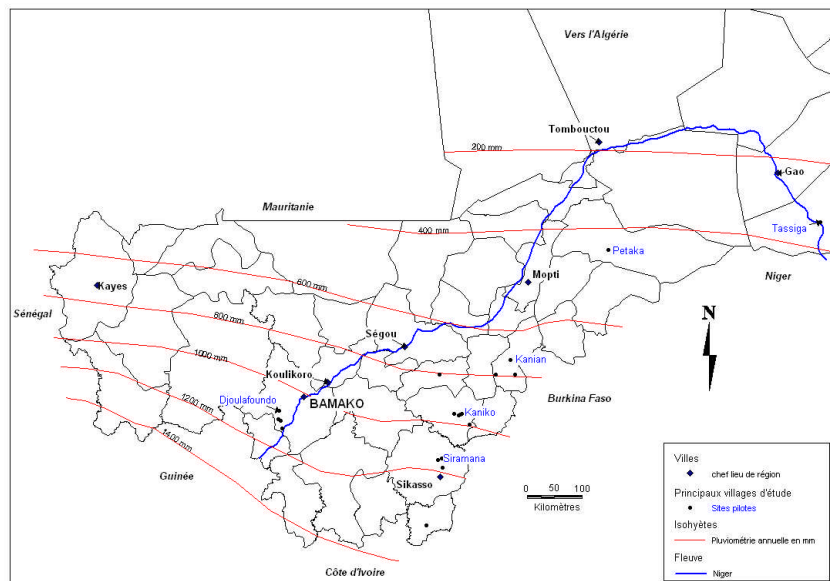


Figure 1 : Localisation au Mali des principaux sites d'étude.

2.2.1. La modélisation d'accompagnement

La modélisation d'accompagnement est une démarche mise au point par un collectif de chercheurs issus de différentes disciplines [4], [9]. Elle vise à faciliter des processus collectifs de décision sur la gestion de ressources naturelles en s'appuyant sur la formalisation des points de vue et des critères subjectifs auxquels se réfèrent les différentes parties prenantes. Cette formalisation s'opère dans différents modèles construits au cours de cycles itératifs permettant la remise en question continue des représentations. Un cycle de modélisation d'accompagnement comporte typiquement trois étapes : 1. synthèse des connaissances existantes, 2. formalisation dans un modèle, 3. simulation et confrontation aux parties prenantes.

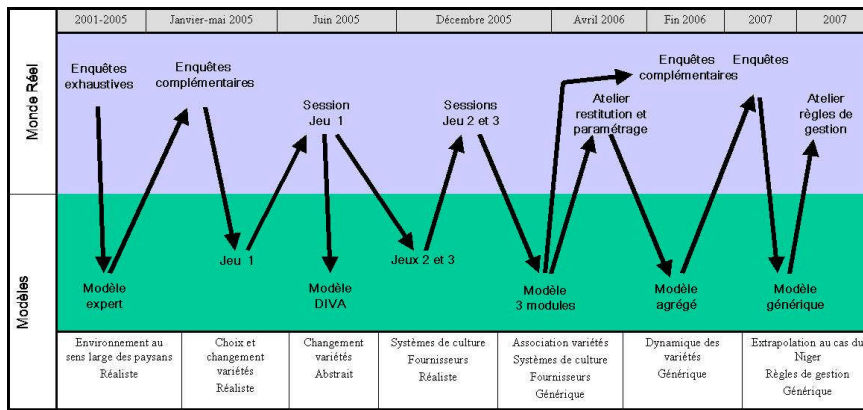


Figure 2 : Démarche itérative de la modélisation d'accompagnement développée au Mali.

La figure 2 retrace les étapes du processus initié où nous avons utilisé les systèmes multi-agents (SMA) et les Jeux de Rôles (JdR) :

- mobilisation des données d'enquêtes obtenues à l'échelle de l'exploitation agricole sur une trentaine de villages pour construire l'architecture d'un modèle multi-agents expert (octobre 2004) ;
- identification des lacunes pour mener des enquêtes complémentaires et formalisation des hypothèses établies dans un premier JdR (jeu 1) ;
- mise en oeuvre du Jeu 1 lors d'un atelier en juin 2005 : construction de nouvelles hypothèses sur les stratégies paysannes d'association de variétés (module 1) ;
- identification de deux autres modules qui permettent de caractériser les liens entre le paysan et son environnement par rapport à la gestion des variétés : influence des systèmes de culture sur le choix des variétés (module 2) et importance des aspects sociaux et spatiaux dans les échanges de semences (module 3). Formalisation des hypothèses correspondantes dans deux JdR (jeux 2 et 3) ;
- mise en oeuvre des jeux 2 et 3 lors d'ateliers en décembre 2005 : révision des hypothèses ;
- généralisation dans un SMA comportant 3 modules correspondant aux 3 JdR.
- mises en situation du SMA au cours d'un atelier en avril 2006 : analyse et discussion des similarités et des différences propres à chacune des 5 situations agricoles retenues.

- mise en œuvre du JdR « Seed-Div » dans un atelier sur les règles de gestion en avril 2007 afin de travailler sur l'émergence de nouvelles institutions favorables à la conservation et à un accès partagé à la diversité variétale.

2.2.2. Les enquêtes

Un important travail d'enquêtes a été conduit durant 4 années au Mali avec, pour objectif principal, la caractérisation des écosystèmes à base de sorgho. L'identification des variables constituant l'environnement des systèmes de cultures à base de sorgho a été conduite autour de trois axes : 1- l'analyse socio-économique des agroécosystèmes céréaliers ; 2- l'analyse agronomique de la culture du sorgho ; et 3- l'analyse de la biodiversité du sorgho et des facteurs relatifs à son évolution. Cette approche classique a été couplée avec la création d'un système spatialisé d'information sur l'environnement du sorgho intégrant la caractérisation bioclimatique du pays et les résultats d'un zonage agroécologique. Une cartographie détaillée des sites pilotes à l'échelle des territoires villageois a été conduite avec pour objectif de préciser la place de la diversité variétale du sorgho dans les stratégies d'assolement. L'analyse des modes de culture du sorgho s'appuie alors sur le choix des variétés en fonction des facteurs de l'environnement au sens large des géographes incluant la diversité des exploitations. L'approche spatiale permet de bien prendre en compte l'abondance des différentes variétés au-delà d'une simple liste représentant une richesse variétale.

2.2.3. Les jeux de rôles

Le jeu de rôle correspond à la mise en scène d'une situation complexe dans un espace contrôlé. C'est un modèle qui sert de médiateur avec une réalité parfois difficile à formuler pour un paysan lors des enquêtes et, dans ce cas, l'aspect ludique du jeu favorise les échanges d'information. L'objectif principal de la première série de jeux de rôles mis en place au Mali est d'améliorer notre connaissance [ou représentation du système] en la partageant pour la remettre sans cesse en question (tabl. I):

- le Jeu 1 plaçait les paysans en situation dans des exploitations agricoles virtuelles soumises à des contraintes climatiques accentuées. Il a permis d'identifier des stratégies archétypales d'association de variétés mais aussi un manque de connaissances sur les différentes modalités d'approvisionnement en semences et sur l'influence de la succession des cultures sur les choix variétaux ;
- le Jeu 2 s'est alors intéressé spécifiquement aux systèmes de cultures et aux rotations ;

- le Jeu 3 s’est focalisé sur les contraintes spatiales et sociales lors de l’approvisionnement en semences. Différents types de fournisseurs ont pu être associés à des modes de recherche spécifiques.

Tableau I : Principales caractéristiques des jeux de rôles mis en place au Mali.

Jeux de rôles	J1 Système de production	J2 Système de culture	J3 Fournisseurs
Question posée	Assurer la sécurité alimentaire de la famille	Définir l’assolement de l’exploitation en respectant la succession des cultures	S’adapter au changement climatique en changeant, si nécessaire, ses variétés
Objectif général	Analyser les comportements de gestion des variétés de sorgho selon les types d’exploitations	Comprendre le choix des variétés de mils et de sorghos dans le temps et l’espace	Caractériser les modalités d’accès aux semences en fonction des fournisseurs
Joueurs	12 joueurs (diversité des systèmes de production, liens familiaux) Exploitation identique à la leur.	15 joueurs (3 tailles d’exploitations sur 3 sols contrastés) Exploitation « modèle » correspondant à la taille de la leur et sur un seul sol.	10 joueurs (diversité des types de systèmes de production, liens familiaux) 3 rôles: chef de village, organisation paysanne et détenteur des savoirs traditionnels. Les joueurs jouent leur rôle et leur exploitation.
Espace	Tables pour les groupes familiaux. Maquette du village comme espace collectif.	3 tables pour chaque groupe de 5 exploitations cultivant sur un même sol	2 tables réunissant sur un même sol 5 exploitations. 1 table pour les types de fournisseurs extérieurs au village. Chaises en cercles pour chaque groupe familial.
Déroulement du temps	Année agricole découpée en 3 pas de temps : annonce de la saison climatique, récolte et sélection des semences, saison sèche	Pas de temps annuel avec annonce de l’année climatique	Année agricole scindée en 4 pas de temps : annonce de la saison climatique, récolte et sélection des semences, échanges familiaux, saison sèche. Carte d’évènements
Date réalisation	Juin 2005	Décembre 2005	Décembre 2005

Pour faciliter l’appropriation par les paysans de l’environnement virtuel proposé, nous avons toujours inclus des éléments de contexte du monde réel : structure de l’exploitation agricole, famille, surface, appellations locales, etc... On parle alors de réalité explicite : le jeu offre une représentation réaliste des acteurs, des ressources et des configurations spatiales rencontrées par les paysans dans la réalité. Le paysan joue son

exploitation avec les caractéristiques qu'il lui connaît : surface cultivée, équipement, population active, bouches à nourrir, cultures, etc. Le JdR Seed-DIV se place dans une autre perspective avec un objectif nouveau de servir de support au dialogue entre des paysans issus de régions différentes. Afin de faciliter les échanges, le jeu était volontairement très abstrait afin de que les participants dialoguent collectivement autour d'un système générique sur les stratégies à mettre en place permettant le maintien en commun d'une diversité variétale.

2.2.4. Les SMA

Les SMA sont issus du domaine de l'intelligence artificielle distribuée qui cherche à résoudre les problèmes par la coordination d'agents hétérogènes indépendants. Les agents perçoivent leur environnement et les autres agents, et s'en construisent des représentations. Utilisant des capacités de raisonnement plus ou moins évoluées, ils agissent alors en modifiant l'environnement ou en communiquant avec les autres agents. Les SMA sont adéquats pour la simulation de formes de coordination observables sur le terrain, en particulier dans le domaine de la gestion des ressources renouvelables car ils sont bien adaptés à l'étude de problèmes intégrant des dynamiques naturelles et sociales [10]. La modélisation multi-agents permet de simuler les changements de règles de gestion et de comprendre les effets superposés des stratégies individuelles et des règles collectives. C'est dans ce cadre que nous avons utilisé les modèles comme outils de médiation et de partage de la connaissance pouvant servir de support aux questionnements, l'objectif étant de réfléchir à des techniques, règles ou attitudes favorables au maintien de la diversité génétique *in situ* et notamment de déterminer l'échelle la plus adéquate pour définir des règles relatives à la conservation *in situ* des variétés de céréales.

3. RÉSULTATS

La formalisation du système semencier dans des systèmes multi-agents s'est construite selon une démarche itérative en boucles où trois modèles multi-agents ont été produits (tabl. IIa et IIb):

- un premier modèle « expert » synthétisait l'ensemble des hypothèses issues des enquêtes ;
- un second modèle abstrait formalisait les comportements des joueurs lors du Jeu 1 ;
- un troisième modèle générique reprend dans des modules indépendants les modalités de prise de décision identifiées dans les trois ateliers de jeux.

Tableau IIa : Niveau de réalisme, paramètres et dynamiques pour les entités naturelles dans chacun des 3 modèles produits.

	Modèle EXPERT	Modèle DIVA	Modèle à 3 MODULES
CLIMAT			
Paramètres	Ø	Facteur d'impact sur le rendement (entre 0 et 1)	Date d'arrivée des pluies Cumul de précipitation
Dynamiques	Ø	Généré aléatoirement	Lecture de séries climatiques
Données	Ø	Ø	Séries climatiques historiques Appréciation année paramétrée par les utilisateurs
CULTURE			
Paramètres	Type de culture (coton / maïs / sorgho / mil / autres / jachère) Parcelle (surface, localisation)	1 seule culture : le sorgho	Type de culture (coton / maïs / sorgho / mil / autre) Surface dans l'exploitation
VARIETE			
Paramètres	Nom des variétés de la région Probabilité initiale de présence	5 variétés abstraites Rendement maximal 4 caractéristiques abstraites	Cycle: précoce, moyen, tardif Nom de 3 variétés par type
Dynamiques	Ø	Rendement selon climat	Matrice de gain f(type/climat)
Données	Statistiques issues des enquêtes*	Génération aléatoire des caractéristiques Fonction théorique d'impact du climat	Caractérisation qualitative de l'écologie des variétés de sorgho

*Les statistiques utilisées dans le modèle expert sont basées sur 3 zones géographiques : San, Koutiala et Sikasso

D'un modèle expert complexe car très réaliste, les modèles suivants ont gagné en abstraction en affinant les hypothèses et en se limitant aux variables déterminantes du système pour le choix des variétés de sorgho.

Tableau IIb : Niveau de réalisme, paramètres et dynamiques pour les entités sociales et spatiales dans chacun des 3 modèles produits.

	Modèle Expert	Diva	Modèle à 3 Modules
TERRITOIRE			
Paramètres	Texture, Pente et Profondeur des sols	Territoire uniforme	2 types de sol
Dynamiques	Priorité de défriche	Ø	Priorité de défriche
Données	Statistiques issues des enquêtes*	Ø	Paramétrage par les utilisateurs
EXPLOITATION			
Paramètres	Nombre de champs (1 à 3) Taille des champs (4 à 13 ha) Voisinage (distance seuil) Groupe Familial (3 à 5)	Nombre de parcelles (5) Voisinage (territoire entier) Groupe Familial (3 à 5 exploitations)	Taille de l'exploitation (G/P) Niveau d'équipement Voisinage (distance seuil) Groupe Familial (3 à 5)
Dynamiques	Assolement, rotations	Rendement moyen	Attribution des stratégies
Données	Statistiques issues d'enquêtes*	Fonctions théoriques	Paramétrage par les utilisateurs
AGRICULTEUR			
Paramètres	Nombre de variétés (1 à 3) Mode d'essai (direct, échantillon, progressif) Choix initial des variétés	4 préférences pour chacune des caractéristiques des variétés Facteur d'impact des préférences Stratégie de remplacement (actif ou passif) Stratégie de recherche (idéotype ou pas)	Stratégie d'association de variétés Système de culture Stratégie de recherche de variété Nombre de variétés Base de connaissance variétés
Dynamiques	Essai d'une nouvelle variété tous les 10 ans avec 75% de chance de réussite Recherche de variétés dans le voisinage et/ou le Groupe Familial	Calcul de la satisfaction (préférences et rendements) Recherche d'une variété selon ses caractéristiques et /ou son poids (taux de présence et proximité)	Calcul d'un assolement selon climat et stratégies Recherche de variété dans le voisinage et/ou le Groupe Familial selon stratégie de recherche de variété
Données	Statistiques issues des enquêtes*	Fonctions théoriques caractérisant des types de stratégies observées	Caractérisation qualitative de stratégies observées

*Les statistiques utilisées dans le modèle expert sont basées sur 3 zones géographiques : San, Koutiala et Sikasso

3.1. Des enquêtes de terrain... à la formalisation du modèle expert

Le sorgho est cultivé du sud du Mali jusqu'à la fin de la bande sahélienne sous environ 500 mm de pluviométrie annuelle avec un risque de sécheresse qui est intégré aux stratégies paysannes. Partout, les agriculteurs ont gardé de multiples variétés locales qui ont comme caractéristiques communes leur adaptation aux conditions écologiques locales et le calage de leur cycle avec le microclimat de la zone géographique [16]. C'est le photopériodisme qui permet l'ajustement du cycle de la plante à la durée probable de la saison des pluies en permettant une grande souplesse dans les dates de semis. Les exploitations agricoles se différencient en fonction de leur taille (surface et main d'œuvre disponible) et du niveau d'équipement qui détermineront la possibilité de semer plusieurs variétés de sorgho chaque année sur différents sols.

L'élaboration de référentiels locaux de la culture du sorgho nous a permis de préciser les pratiques paysannes relatives à la culture du sorgho pour prévoir l'aire de diffusion des variétés locales ou améliorées [6], [14]. Malgré la sécheresse, les variétés photopériodiques occupent toujours une place prépondérante dans les systèmes de culture où la gestion du risque l'emporte sur les besoins d'intensification. C'est pourquoi dans la connaissance de l'agrobiodiversité, le nombre de variétés gérées dans l'exploitation et l'identification de la dynamique de remplacement, constituent un pas essentiel pour l'identification de nouveaux modes de conservation [7].

Le modèle premier multi-agents dit «expert» a été développé pour mettre en relation les nombreux résultats issus des enquêtes et représenter au sens large l'environnement des paysans : les différentes entités du territoire et la structure sociale des paysans [8]. Ce modèle expert a servi d'intégrateur pour les diverses disciplines et permis de préciser les paramètres d'entrée nécessaires pour caractériser le système semencier. La création d'un état initial de référence «modulable» permet de paramétrer les spécificités environnementales ou structurelles des exploitations agricoles des différentes zones géographiques du Mali. Néanmoins, le modèle expert reste statique et il est nécessaire d'implémenter des règles de dynamique pour pouvoir réaliser des simulations sur des scénarios simplifiés de circulation des variétés autour des cas suivants : pas d'introduction extérieure, accès par proximité spatiale des champs, accès aux pools de variétés des groupes familiaux et connaissance des personnes ressources.

3.2. Des lacunes du modèle expert au premier jeu de rôle

Après avoir identifié les lacunes du modèle expert sur le remplacement des variétés, des enquêtes spécifiques ont été conduites pour hiérarchiser les

critères de choix des variétés et les modalités du changement. La curiosité et la volonté d'améliorer la productivité poussent certains paysans à tester régulièrement de nouvelles variétés sans pour autant noter d'échec sur leurs précédentes cultures. Le climat est le plus souvent à l'origine du changement de variété mais des modifications de la stratégie agricole de l'exploitation peuvent également être impliquées ; par exemple le développement de la culture du maïs dans le sud du Mali. Enfin, l'introduction d'une nouvelle variété ne prend pas forcément la forme d'un test sur plusieurs années.

Lors du premier jeu de rôle, en fonction de la date d'arrivée des pluies, les paysans devaient choisir des variétés de sorgho pour atteindre un objectif de production correspondant aux besoins alimentaires de leur famille. En fonction des rendements obtenus, calculés à partir d'abaques, les paysans étaient libres de produire de la semence sur leur parcelle ou de rechercher de nouvelles semences à l'extérieur. L'objectif de production est contraint par la quantité de travail disponible pour déterminer l'assolement décrit en termes de surfaces par culture et de variétés semées à des dates précises. Le premier JdR permet de faire ressortir deux résultats essentiels qui ont alimenté notre démarche de modélisation d'accompagnement par la suite :

- le comportement du paysan pour la décision de changement de variété peut reposer sur un processus d'évaluation propre ou sur un processus d'imitation des voisins ;
- l'hypothèse de trois stratégies distinctes d'association des variétés au sein de l'exploitation sur laquelle a été construite un module du troisième SMA.

3.3. Le modèle abstrait DIVA

Le SMA « DIVA » (pour DIVERsité Variétale) représente la gestion paysanne de la biodiversité dans un modèle de décision simple, déconnecté de l'environnement réel. Il permet de tester les conséquences à un niveau global de la somme de décisions individuelles relatives au choix de variétés selon deux processus d'évaluation ou d'imitation. La portée théorique du modèle repose sur la question de la diffusion d'une innovation, la variété dans notre cas, grâce à la communication entre les individus. L'échange d'information est possible au sein d'un réseau géographique, correspondant à l'environnement physique du paysan et d'un réseau social, correspondant à l'univers social propre à chaque paysan. Ce réseau social permet à des individus géographiquement éloignés d'échanger des informations qu'ils ne pourraient pas ou rarement avoir avec leur entourage proche. Il est contraignant, dans le sens où il est prioritaire sur la distance qui sépare deux individus. Deux comportements paysans archétypaux peuvent être décrits:

- Les paysans passifs fonctionnent sur un mode d'imitation où les variétés introduites sont celles qui sont le plus cultivées autour d'eux.
- Les paysans actifs sont sans cesse à la recherche d'un « idéotype » de variété. Le paysan prend alors un risque pour introduire une variété dans son exploitation sans référence sur celle-ci dans son voisinage. Les agents de DIVA doivent donc évaluer le niveau de production de leurs parcelles à chaque pas de temps et lorsque les résultats sur leur(s) variété(s) semée(s) ne leur conviennent pas, ils choisissent une nouvelle variété en fonction de leurs préférences.

La stratégie passive d'imitation (fig. 3) correspond à une situation stable dans laquelle aucune variété ne semble prendre le dessus sur les autres. A l'opposé, la stratégie active d'évaluation aboutit très rapidement à un déséquilibre dans lequel une variété domine (fig. 3). La diversité globale du système chute très vite et seules deux variétés se maintiennent dans le système avec l'une qui représente 80% des surfaces semées. Nous pouvons souligner la puissance de l'outil de modélisation qui, avec des règles très simples de décisions des agents dans leur environnement, donne la possibilité de produire des situations qui seraient très difficilement prévisibles et caractérisables par une approche mathématique classique. Dans notre cas, nous ne cherchons pas à valider la réalité des règles introduites dans le modèle mais plutôt à les utiliser pour discuter de façon théorique du type de comportement qu'elles illustrent. Ainsi, on s'intéresse plus à l'impact d'une introduction sur la biodiversité au niveau global qu'au fait qu'une variété prenne le dessus sur les autres.

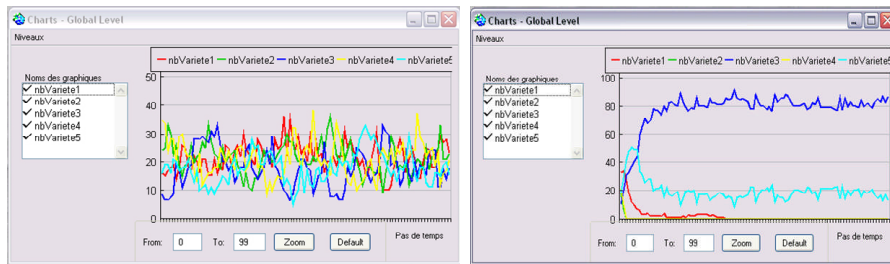


Figure 3 : Analyse de sensibilité du modèle DIVA sur 2 scénarios :

à gauche : 100 % des paysans suivent la stratégie passive d'imitation ;

à droite : 100 % des paysans suivent la stratégie active d'évaluation.

3.4. Une décomposition du système en 3 modules

La désagrégation de notre représentation du système semencier permet d'analyser progressivement les règles dans des sous-systèmes en éliminant volontairement au départ certaines relations. Chaque contexte de décision

particulier a fait l'objet du développement d'un module indépendant et le modèle final est structuré en trois modules indépendants [1] :

- Les stratégies d'association de variétés ;
- La composante système de culture en fonction de la structure de l'exploitation;
- La quête du fournisseur ;

Les hypothèses issues du jeu 1 permettent de formaliser les dynamiques du module « stratégies d'association de variétés ». Dans le jeu 2, les paysans devaient établir leur assolement annuel en tenant compte des rotations et des contraintes climatiques. Lors du jeu 3, les paysans devaient chercher des semences en fonction d'événements marqués, alors que certains d'entre eux représentaient des rôles particuliers dans le village et que les animateurs jouaient le rôle de fournisseurs extérieurs. Les résultats des jeux de rôles 2 et 3 alimentent les modules « système de culture » et « fournisseur ».

4. DISCUSSION

4.1. Complémentarité des approches : du jeu au SMA

Les différents jeux ont permis d'améliorer notre connaissance sur le système semencier et, d'implémenter immédiatement les nouveaux résultats dans le modèle en construction permanente. Sans acquérir nécessairement de connaissances nouvelles, le jeu permet de bien remettre les hypothèses et résultats déjà acquis sous forme de relations cohérentes. Ainsi, la gestion des variétés selon les types d'exploitation est déterminée par deux facteurs principaux : la surface et le niveau d'équipement. C'est en effet la capacité de travail qui influence en premier lieu le calendrier agricole de l'exploitation et les choix variétaux qui en découlent (JdR2). De la même façon, le JdR3 a permis de valider notre structuration sociale des exploitations avec les personnes ressources, les groupes familiaux, les petits et gros producteurs mais il a surtout mis l'accent sur l'environnement spatial et temporel qui favorise ces échanges.

En soumettant à la fois nos outils à la critique et nos résultats à la réfutation, nous nous engageons réellement dans une co-construction sur la base d'un partenariat équitable. Ces échanges lors des étapes de debriefing des jeux nous ont permis de spécifier trois cas particuliers relatifs à la recherche d'une variété qui déterminent des cheminements différents pour l'accès à la semence recherchée :

- recherche de la quantité nécessaire d'une variété pour semer toute sa parcelle ;

- recherche d'un type de variété précis connu sur village (même si peu de semence) ;
- recherche d'une variété nouvelle (idéotype) non connue qu'il faudra expérimenter.

4.2. La construction du modèle autour des 3 modules du système

L'objectif du 3^e modèle SMA est de pouvoir travailler indépendamment sur chacun des trois aspects de la prise de décision des paysans. Les trois modules peuvent fonctionner ensemble, ou bien séparément. Dans ce cas, là, un comportement est défini par défaut dans le modèle pour les modules non utilisés. Ce modèle présente un niveau d'abstraction supérieur au modèle expert pour faire discuter des paysans issus de différentes régions. Cette abstraction se traduit par une qualification qualitative des paramètres descriptifs du modèle (climat, types de variétés, gains, types de sols, taille et équipement des exploitations). Une simulation permet d'observer la dynamique d'occupation des variétés dans un village avec un pas de temps annuel. Le climat simulé est construit à partir de séries climatiques historiques sur les régions d'origine des paysans et caractérisées qualitativement par leurs soins en début de session. Selon l'année climatique, les agents paysans déterminent leur assolement (module système de culture ; par défaut valeur moyenne sur la région) et les variétés qu'ils sèment (module association de variétés ; par défaut choix d'une variété moyenne). Des gains traduisent le niveau de rendement obtenu. Selon les gains obtenus et leur stratégie définie de renouvellement des semences, les agents paysans peuvent changer de variétés. Ils recherchent alors des semences dans le village ou bien s'adressent à des fournisseurs extérieurs.

Dans la perspective d'utilisation rapide des modèles multi-agents pour la mise en place d'un dialogue entre acteurs de la gestion des RPG, la caractérisation génétique a été passée sous silence pour afficher une caractérisation des variétés davantage agromorphologique que génétique, plus en accord avec la représentation des variétés que se construit le paysan. Néanmoins, la dimension de la diversité génétique des variétés paysannes devra être considérée de façon plus approfondie dans le futur au sein de nos modèles pour analyser réellement la dynamique *in situ* de cette diversité au travers des pratiques et stratégies paysannes de gestion.

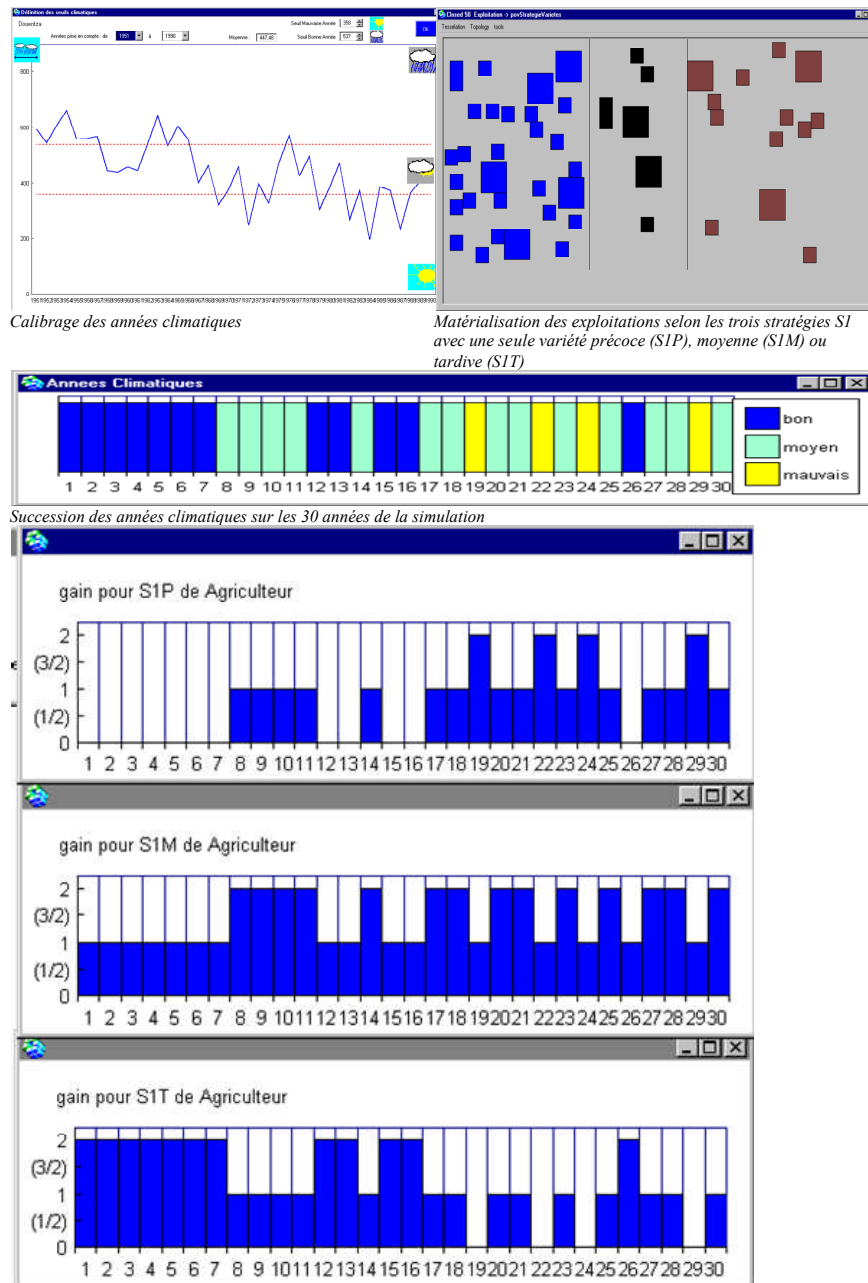


Figure 4 : Calibrage des saisons des pluies et simulation des gains sur 30 ans (Douentza).

4.3. L'appropriation du modèle par les paysans

La construction d'un modèle sur la base de modules mis en situation dans des JdR facilite son appropriation par les paysans qui participent au paramétrage du modèle pour leur région. A titre d'exemple, le module « association des variétés » a été construit en simplifiant la réalité du choix des variétés de sorgho à trois types, précoce, moyen et tardif, en fonction du calage de leur maturité avec la fin de saison des pluies qui peut être bonne, moyenne ou mauvaise. C'est sur ce dernier point que le paysan travaille avec nous sur le calibrage du modèle pour sa région. L'ordinateur dispose de séries climatiques sur 40 ans qui permettent de présenter une courbe des précipitations annuelles. Le travail se fait spécifiquement sur une zone (fig. 4) et les paysans d'autres régions réagissent s'ils ont un mode de raisonnement différent. Les paramètres de caractérisation de la saison climatique pris en compte par le paysan pour faire son choix de variété sont principalement : la date de début et de fin de saison des pluies et le cumul pluviométrique annuel. Ces indicateurs sur l'année climatique de 5 régions agricoles du Mali ont été décrits par les paysans afin de distinguer les bonnes, moyennes et mauvaises années pour la production agricole. Ces paramètres ont ensuite été appliqués, grâce au modèle, à des séries climatiques sur 30 ans (1969-1998) pour tester via des simulations la réponse du modèle aux choix des paysans (fig. 4). Cette simulation du gain pour une stratégie donnée permet de visualiser immédiatement des résultats sur un nombre d'année défini et de tester la robustesse du modèle, puis d'explorer et de comparer des stratégies entre elles.

Les jeux 2 et 3 s'appuyaient sur plusieurs résultats d'enquêtes : d'une part le morcellement d'une exploitation sur plusieurs sols augmente le nombre de variétés de sorgho cultivées dans l'exploitation et, d'autre part, la taille et le niveau d'équipement sont les déterminants de la structure des exploitations qui influencent en premier lieu le choix des variétés. Les facteurs de production étant ainsi fixés, l'ajustement se fait sur le choix des cultures et des variétés pour établir un assolement donné en fonction de l'année climatique. Même si les critères qui fixent les seuils entre grandes et petites exploitations, équipées ou non, diffèrent d'une région à l'autre, ce schéma reste valable quelle que soit la zone climatique. Grâce à l'articulation du SMA en modules, il est possible d'appliquer une stratégie particulière à une structure d'exploitation donnée (fig. 5). La simulation sur un certain nombre d'années permet alors de suivre les résultats de chaque agriculteur dans une stratégie particulière ou de se placer à l'échelle du village pour visualiser l'effet de la diversité des stratégies à un niveau plus global. C'est à ce niveau que la dynamique des variétés est suivie et analysée au travers des rôles joués par chaque type de paysan. Le modèle utilisé comme support de discussion permet de traiter chaque cas d'utilisation d'une variété de façon pratique

avec les paysans. En simulant sa réponse à la série climatique de la zone paramétrée par les paysans pour discuter ensemble, chercheurs et paysans débattent des meilleures variétés mais surtout des combinaisons possibles de variétés pour améliorer globalement la production et limiter le risque pour le paysan. La figure 5 prend en compte la typologie des exploitations d'un village moyen et analyse comment les contraintes structurelles de l'exploitation déterminent des choix variétaux spécifiques intégrés dans l'assolement et les rotations.



Figure 5 : Distribution des structures d'exploitations dans un village et, implémentation des stratégies d'association de variétés (cas de San).

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES : VERS L'ÉMERGENCE DE NOUVELLES RÈGLES DE GESTION

L'organisation des différentes sessions de jeux de rôles montre qu'il s'agit d'un outil bien adapté pour valider des hypothèses ou des résultats acquis par ailleurs et permettre de les discuter le cas échéant pour formuler de nouvelles hypothèses. La synthèse des données collectées et sa formalisation dans un jeu sont apparues comme une étape nécessaire pour partager notre représentation du système semencier avant d'aborder le modèle. Une bonne connaissance du terrain et de ses protagonistes facilite l'organisation du jeu mais aussi les modalités de son observation qui ne prennent sens qu'à la lumière des connaissances précédemment acquises sur le terrain. Le JdR permet une bonne mise en situation des paysans pour partager notre représentation de leur système informel d'échange de variétés. Les paysans apprécient beaucoup l'aspect de mise en scène de leurs pratiques dans le jeu de rôle qui favorise par la suite des discussions plus étroitement connectées à la réalité. Même si des contraintes ont été soulevées sur la mise en œuvre des jeux, il apparaît qu'ils demeurent dans notre cas un passage obligé pour passer à l'étape suivante et aborder le modèle multi-agents de façon sereine. En effet, les modèles informatiques isolés sont souvent illisibles et considérés comme des « boîtes noires » par des non-spécialistes c'est pourquoi il est difficile de communiquer autour d'eux. Leur usage conjoint

avec les jeux de rôle permet, d'une part, de rendre intelligible des modèles conceptuels lourds sous une forme ludique et, d'autre part, d'accélérer le déroulement des jeux (reproduction des résultats sur le long terme) ou d'explorer de nouveaux scénarios en effectuant des simulations [5].

Enfin, la finalité à moyen terme de la simulation multi-agents est de l'utiliser pour favoriser l'émergence de nouvelles règles favorables au maintien de la diversité des variétés de céréales. Le jeu « Seed-DIV » testé en avril 2007 avec des paysans issus de 5 régions du Mali et de 4 régions du Niger a montré la pertinence du modèle pour questionner de nouvelles règles de gestion. Le JdR a alors permis la confrontation de deux modèles de conservation, la banque de semence villageoise et la coopérative semencière. L'adhésion des paysans à notre démarche permet maintenant d'envisager un réel accompagnement de l'évolution des filières semencières informelles par la modélisation en prenant en compte de façon explicite un objectif de maintien de la diversité variétale *in situ*.

REMERCIEMENTS

L'application développée a été initiée par le financement obtenu auprès du BRG[†] grâce à des études portées par le CIRAD[‡] au sein de trois projets: le projet « *Agrobiodiversité du sorgho au Mali et au Burkina Faso* » financé par le FFEM[§] (2002-2006), le projet « *Modélisation multi-agents des réseaux d'échange de semences pour améliorer la conservation in situ des variétés locales de céréales en Afrique de l'Ouest* » financé par le BRG (2005-2007) et le projet « *Vers une autonomie des agriculteurs sahéliens dans la gestion et l'exploitation de la diversité agricole, pour l'amélioration de leurs stratégies de subsistance* » financé par le FIDA^{**} (2005-2007). Le Cirad a initié la démarche avec des chercheurs de l'Institut d'Economie Rurale en impliquant des ONG et des Organisations Paysannes (OP) locales. Mais le succès de ce projet tient surtout à la participation des paysans du Mali et du Niger. Que tous soient ici vivement remerciés de leur aide et du temps passé à échanger sur les modalités d'échanges et de conservation des semences.

[†] Bureau des Ressources Génétiques

[‡] Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

[§] Fond Français pour l'Environnement Mondial

^{**} Fonds International pour le Développement Agricole

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Abrami, G., Bazile, D., Le Page, C., Dembele, S., Dionnet, M., 2005. Preparing a framework for participatory modelling of farmers seed systems in Mali: varieties selection and exchange. In: ESSA (Ed.), *The third annual conference of the European Social Simulation Association*. ESSA, Koblenz-Landau University on September 5–9, 2005, 7 p.
- [2] Almekinders C.J.M., Louwaars, N.P. and Bruijn, G.H.d., 1994. Local seed systems and their importance for an improved seed supply in developing countries. *Euphytica*, 78: 207-216.
- [3] Almekinders C.J.M., Louwaars, N.P. 2002. The importance of the farmer's seed systems in a functional national seed sector. *Journal of new Seeds*, 4/1-2: 15-33.
- [4] Antona M. *et al*, 2003. Our Companion Modelling Approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6-1, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/1.html>.
- [5] Barreteau O., 2003. The joint use of role-playing games and models regarding negotiation processes: characterization of association. . *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6-2, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/3.html>.
- [6] Bazile D., Soumare M., 2003. La valorisation de l'agrobiodiversité pour assurer une production agricole durable. Le cas du sorgho dans la zone cotonnière de Koutiala au Mali. In: ICRISAT and IPALAC (Ed.), *International Symposium for Sustainable Dry land Agriculture Systems*, December 2-5, 2003. ICRISAT, Niamey (Niger), pp. 261-269.
- [7] Bazile D., Soumare M., 2004. Pratiques paysannes de gestion de la diversité variétale en réponse à la diversité écosystémique. Le cas du sorgho [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] au Mali. Étude Originale. *Cahiers Agricultures*, 13: 480-487.
- [8] Bazile D., *et al*, 2005. Perspectives of modelling the farmer's seed system for *in situ* conservation of sorghum varieties in Mali. In: J.B. Cunha and R. Morais (Editeurs), EFITA/WCCA 2005 Joint Conference: 5th Conference of the *European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and Environment* and 3rd World Congress on *Computers in Agriculture and Natural Resources*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 25-28 July 2005, pp. 39-46.
- [9] Bousquet F. *et al*, 2002. Multi-agent systems and role games: collective learning processes for ecosystem management. In M.A. JANSSEN (Ed.), *Complexity and ecosystem management*, Edward Elgar Publishing, pp. 248-285.
- [10] Bousquet F. et Le Page, C., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling*, 176: 313-332.
- [11] Brookfield H. (Ed.), 2001. *Exploring agrobiodiversity*. Issues, Cases, and Methods in Biodiversity Conservation Series. Columbia University Press, New York (USA), 348 p.
- [12] Brookfield H., *et al*, M. (Ed.), 2002. *Cultivating biodiversity*. ITDG Publishing and United Nations University, London (UK), 292 p.
- [13] FAO, 1999. *The state of the world of Plant genetic resources for food and agriculture* (PGRFA). FAO, Rome (I), 511 p.
- [14] Soumare M., 2004. *Contribution à la prévision de l'aire de diffusion de variétés de sorgho au Mali. Couplage entre Modèle de Croissance des Cultures et Système d'Information Géographique*. DEA Géographie, Université de Nanterre, Paris X, 92 p.

- [15] UNEP, 1993. *Convention on Biological Diversity*. Text and Annexes. CBD/94/1. UNEP/CBD, Montreal, 34 p.
- [16] Vaksman M., Tradore S.B. et Niangado O., 1996. Le photopériodisme des sorghos africains. *Agriculture et Développement*, 9: 13-18.
- [17] Wood D. et Lenne J.M. (Editeurs), 1999. *Agrobiodiversity: Characterization, utilization and Management*. CABI Publishing, Wallingford (UK), 490 p.